

Интегрируя уравнение (1) с определением постоянной интегрирования из условия, что на левой границе элементарного клинового объема при $h_r = h_j$, нормальные напряжения $\sigma_r = \sigma_{r0(j)}$, получаем выражение

$$\sigma_{rj} = -2k \left(1 + \frac{2\mu}{\alpha} \right) \ln \frac{h_r}{h_j} + \sigma_{r0(j)}, \quad (2)$$

где j – номер сечения.

Вычисление нормального напряжения на границе областей I и II $\sigma_{r(m+1)}$ с использованием формулы (2) производится численным методом последовательно, начиная со второго сечения от левой границы области I. При этом для свободного течения металла в полости зуба принимается значение $\sigma_{r0(1)} = 0$, а для конечной стадии, когда происходит оформление углов $\sigma_{r0(1)} = 4k$.

Упрочение металла при формообразовании зубьев учитывается принятием средних значений постоянных пластичности по элементарным объемам

$$k_{cp} = \frac{k_j + k_{j+1}}{2}; \quad k_j = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\sigma_{s0} + A \left(\frac{h_0 - h_j}{h_0} \cdot 100 \right)^n \right], \quad (3)$$

где σ_{s0}, A, n – начальное напряжение текучести и коэффициенты линейной аппроксимации кривой упрочения [2].

Область II – кольцо, ограниченное цилиндрической поверхностью, проходящей через основание зубьев и конической поверхностью пуансона. В конечной стадии калибровки длина кольцевых волокон в области II почти не изменяется, т. к. течение металла в полость под зуб весьма незначительно. Следовательно, можно считать, что в конечной стадии калибровки в сечениях кольцевой области II имеет место плоское деформированное состояние.

В области II напряжения находим из совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и пластичности. Использование линейного закона касательных напряжений позволяет получить замкнутое решение, при котором произвольные функции по координатам r и θ находятся из уравнения пластичности с последующим вычислением постоянной интегрирования из условия равенства напряжений на границе областей I и II

$$\sigma_{\theta} = 2k \left(\frac{2\mu}{\beta} + \sqrt{1 - 4\mu^2} \right) \ln \frac{r}{r_a} + \sigma_{r(m+1)}; \quad \sigma_r = -2k \left[\left(\frac{2\mu}{\beta} + \sqrt{1 - 4\mu^2} \right) \ln \frac{r}{r_a} - \sqrt{1 - \frac{4\mu\theta}{\beta}} \right] + \sigma_{r(m+1)}. \quad (4)$$

Величину осевого деформирующего усилия, передаваемого через пуансон, найдем, взяв сумму проекций всех сил на вертикальную ось

$$Q = \iint_S |\sigma_s| \sin \beta dS + \iint_S |\tau_k| \cos \beta dS. \quad (5)$$

Конечная формула для усилия калибровки зубьев шестерни будет иметь вид

$$Q = 2\pi d_c \left[\left(\frac{2\mu}{\beta} + \sqrt{1 - 4\mu^2} \right) \left(2,3b_2 \ln \frac{b_2}{b_1} - b_2 + b_1 \right) + \mu H + \frac{\sigma_{r(m+1)}}{2k} (b_2 - b_1) \right]. \quad (6)$$

При определении напряжений на границе областей I и II выполнено решение численными методами, при этом точность зависит от количества разбиений m .

Выполнена экспериментальная проверка полученного решения для усилия калибровки шестерни редуктора стартера, исходной заготовкой для которой служил полуфабрикат, полученный из железного порошка и подвергшийся спеканию. Эксперимент показал удовлетворительное совпадение расчетных данных, отклонение составило 15%.

Вывод. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния при калибровке зубьев шестерни с радиальным течением металла. Методом совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и пластичности получена формула для деформирующего усилия, необходимого для калибровки зубьев коническим пуансоном.

Список литературы: 1. Теория обработки металлов давлением / Сторожев М.В., Попов Е.А. – М.: Машиностроение, 1977. – 423с. 2. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании: Справочник / Ред. совет: А.В. Третьяков и др. – М.: Машиностроение, 1971. – 63с.

Поступила в редколлегию 06.04.12

УДК 621.9.20.001.24

В.С. НАДЕИН, к.т.н., доцент каф. МС и С КНТУ, Кировоград;
М.Г. СТОРЧАК, к.т.н., научный сотрудник ИМВ ШУ, Штуттгарт, Германия;
А.В. КРИВОШЕЯ, к.т.н., старший научный сотрудник ИСМ НАНУ, Киев;
С.Н. ЗАЙКА, аспирант КНТУ;
Д.В. ГРЫНЬ, к.т.н., ведущий конструктор, Кировоград

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ШЕВИНГОВАНИЯ ОБЛЕГАЮЩИМИ ШЕВЕРАМИ

Погрешности шевингования облегающими шеверами и сложности изготовления и эксплуатации инструмента ограничивают применение этого способа в производстве, несмотря на присущие преимущества. В работе выявлены причины возникновения погрешностей и предложен способ их уменьшения.

Похибки шевінгування облягаючими шеверами та складності виготовлення та експлуатації інструмента обмежують застосування цього способу у виробництві, незважаючи на притаманні переваги. В роботі виявлено причини виникнення похибок та запропоновано спосіб їх зменшення.

Errors shaving tight shever and complexity of manufacture and operation of the tool limit the application of this method in production despite the inherent advantages. The paper identified the causes of errors and a method for reducing them.

Актуальность задачи и цель исследования. Шевингование как процесс чистовой обработки зубьев цилиндрических зубчатых колёс находит широкое применение в машиностроении. Из достаточно большого числа способов шевингования, способ шевингования облегающими шеверами самый производительный и позволяет модифицировать поверхность зубьев обрабатываемого колеса без усложнения кинематической схемы её формообразования [1-3].

Однако применение шевингования облегающими шеверами ограничивается несколькими причинами, основными с которых являются существенные погрешности профиля зубьев и их изменение, как правило, увеличение, по мере переточки шевера.

Целью данной работы есть установление аналитических взаимосвязей параметров процесса шевингования, анализ которых позволит уменьшить или полностью устранить эти основные недостатки. Решение этой задачи актуально как для практики машиностроения в связи с существенным уменьшением энерго- и трудозатрат, так и для теории зубообработки.

Отличительной особенностью шевингования облегающими шеверами является отсутствие продольного перемещения одного звена станочного зацепления, например, шевера, вдоль оси обрабатываемого колеса. В процессе обработки шевер перемещают вдоль межосевого перпендикуляра, вследствие чего межосевое расстояние в станочном зацеплении уменьшается. Для того, чтобы активная поверхность зуба была обработана по всей длине и была при этом эвольвентной поверхностью, необходимо, чтобы производящая поверхность шевера и активная поверхность зубьев касались одна другой по их общей прямолинейной образующей.

Как известно, в станочном зацеплении шевер и обрабатываемое колесо образуют винтовую эвольвентную передачу, т.е. образуют трехзвенный зубчатый механизм, оси звеньев (т.е. шевера и колёса) которого скрещиваются. Несмотря на то, что и производящая поверхность шевера, и обработанная поверхность зубьев колеса суть поверхности эвольвентные, в общем случае винтовые и линейчатые, касание их в момент профилирования точечное. Единственной общей линией, и притом прямой, является ось мгновенного вращения-скольжения. Но эту линию можно использовать только для образования аксоидных и начальных поверхностей звеньев передачи.

Эти рассуждения приводят к выводу о необходимости отыскания производящей поверхности шевера, линейно сопряженные с поверхностью зуба обрабатываемого колеса, и способа ее изготовления и эксплуатации с учетом материальных затрат.

На данный момент времени имеет место применение способа шевингования облегающими шеверами с модифицированной продольной формой зубьев [4, 5]. Суть модификации состоит в том, что точечный контакт активной поверхности зуба колеса с производящей поверхностью зубьев шевера заменяется на контакт линейный. Преобразования вида контакта заключается в том, что производящую поверхность каждого зуба шевера относительно среднего сечения ширины его венца изгибают во внешнюю сторону так, чтобы полученная при этом "деформированная" новая производящая поверхность касалась поверхности

зубьев обрабатываемого колеса на вогнутой линии. Для получения такой модификации производящую поверхность шевера шлифуют на специальных заточных станках внутренней стороной конического круга.

Экспериментальные исследования процесса шевингования такими облегающими шеверами показали, что:

- точность обработки зубчатого венца значительно ниже таковой, обработанной другими способами шевингования;
- по мере переточки шевера погрешности обработки изменяются, в результате чего требуется изменение параметров производящей поверхности шевера.

Вывод авторов этих исследований практически одинаков: причина недостатка этого процесса заключается в трудностях точного изготовления производящей поверхности облегающего шевера.

Постановка и решение задачи. Выполненное нами исследование процесса шевингования позволяет утверждать, что причины указанных выше недостатков заключаются не в трудностях точного изготовления облегающего шевера.

Результаты исследований [6, 7] показали, что точность изготовления шевера, будучи весьма влиятельным фактором процесса шевингования, проявляет себя только тогда, когда более влиятельные факторы процесса свое негативное влияние на качество обработки уже оказали. Собирательным названием этих факторов будет термин "сопряженность станочного зацепления", так как основой процесса шевингования есть формообразования поверхностей зубьев колеса методом огибания при отсутствии жесткой кинематической связи формообразующего движения огибания и обкаточного движения круговой подачи.

Можно аналитически показать, что производящая поверхность шевера, выполненная как огибающая вогнутой конической поверхности абразивного круга, образованная в станочном зацеплении, идентичном станочному зацеплению шевера с торцевой плоскостью круга, будет поверхностью неэвольвентной. Участки задней поверхности режущих зубчиков шевера, а они одновременно есть и часть неэвольвентной производящей его поверхности, будут контактировать с поверхностью зуба колеса – заготовки, которая на фазе зацепления в один угловой шаг обработана только частично (полосками по высоте зуба, чередующимися с необработанными участками). Необработанные участки поверхности зуба колеса-заготовки на фазе зацепления играют роль направляющей поверхности при резании. Если учесть, что при двухстороннем шевинговании зоны обработки на противоположных сторонах впадины смещены вдоль оси шевера, то глубина внедрения режущих зубчиков шевера в удаляемый слой металла переменная. В результате поверхность зуба, которая на следующем переходе будет играть роль направляющей, будет иметь погрешности, которые будут переноситься на окончательно обработанную поверхность.

Эти кинематически возникшие погрешности суммируются с погрешностями профилирования производящей поверхности шевера, следствием чего и есть точность обработки.

Для повышения точности шевингования нужно уменьшить или устранить (по возможности) перечисленные недостатки шевингования облегающими шеверами. Для этого нужно решить две основные задачи:

- 1) синтезировать производящую поверхность шевера, сопряженную поверхности зубьев обрабатываемого колеса с линейным контактом;
- 2) устранить погрешности кинематики станочного зацепления на протяжении всего цикла обработки.

Далее приведено одно из решений первой задачи

Задачу синтеза производящей поверхности шевера, имеющей линейный контакт с эвольвентной поверхностью зуба колеса, можно решить следующим образом.

Возьмём в качестве исходной пространственную передачу, составленную из эвольвентного цилиндрического косозубого колеса и дискового косозубого шевера. Такая передача будет иметь точечный контакт поверхностей зубьев и прямую линию зацепления.

Для того, чтобы в исходной передаче получить линейный контакт нужно воспользоваться первым способом Оливье-Гохмана образования сопряженных подвижных поверхностей. Для реализации этого способа в качестве общей производящей поверхности применим винтовую эвольвентную поверхность червячной фрезы.

Составим два станочных зацепления: червячной фрезы с колесом исходной передачи и шевером. При формообразовании поверхностей зубьев колеса оно перемещается вдоль своей оси и вращается вокруг нее, а червячная фреза только вращается вокруг своей оси. При формообразовании поверхностей зубьев шевера червячная фреза и шевер вращаются вокруг своих осей и червячная фреза перемещается в радиальном направлении к оси шевера. Скорости вращения шевера, колеса и червячной фрезы, а также их положение в пространстве определены в соответствии с правилами настройки станка.

В станочных зацеплениях, описанных выше, будут образованы зубчатые колеса, первое из которых будет обычным косозубым, а второе будет червячным с неэвольвентной поверхностью зубьев [8]. Одной из особенностей этого червячного колеса есть то, что оно абсолютно правильно сцепляется с эвольвентным червяком, не превышающим по диаметру вершин червячную фрезу, нарезавшую его, имеет в этом зацеплении прямую линию зацепления и практически нечувствительно к погрешностям положения относительно червяка. Естественно предположить, что поскольку косозубое цилиндрическое эвольвентное колесо можно представить как многовитковый эвольвентный червяк, то имеется возможность подобрать такие его параметры, при которых неэвольвентная поверхность зубьев червячного колеса будет правильно сопрягаться с поверхностью эвольвентных зубьев цилиндрического колеса-червяка по линии, но не по прямой.

Эта же неэвольвентная поверхность зубьев червячного колеса будет сопряженной с поверхностью витков эвольвентного червяка при числе его витков, отличном от числа витков эвольвентного червяка-колеса, которым была образована.

Это означает, что образование поверхности зубьев неэвольвентного червячного колеса можно осуществить одновитковым эвольвентным червяком.

Для оценки пригодности поверхности зубьев неэвольвентного червячного колеса быть примененной в качестве производящей поверхности облегающего шевера, рассмотрим представленную на рисунке схему станочного зацепления её формообразования.

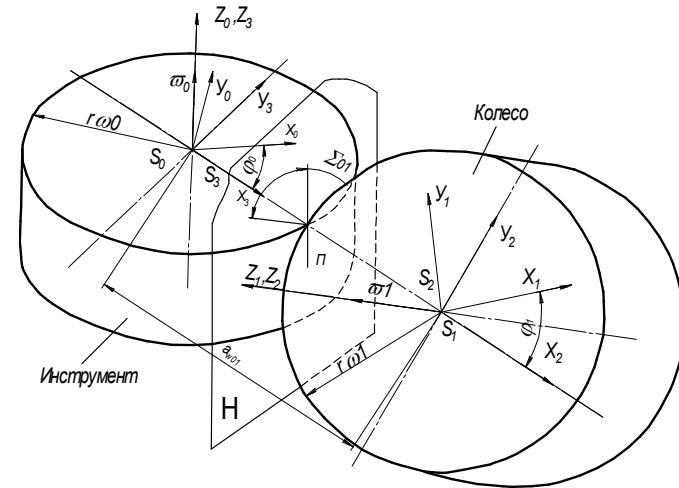


Рисунок – Схема станочного зацепления для нарезания шевера с неэвольвентной производящей поверхностью

Применив известную методику исследования станочного зацепления [9], получим уравнения поверхности зуба неэвольвентного шевера в его системе координат S_1

$$\begin{aligned}
 X_1 &= A \cos \varphi_0 + B \sin \varphi_0 \sin \gamma - C \sin \varphi_0 \cos \gamma + (r_0 + r_1) \cos \varphi_0; \\
 Y_1 &= -A \sin \varphi_0 + B \cos \varphi_0 \sin \gamma - C \cos \varphi_0 \cos \gamma + (r_0 + r_1) \sin \varphi_0; \\
 Z_1 &= B \cos \gamma + C \sin \gamma + r_0; \\
 u &= r_{b0} \cos(\nu + \varphi_0) + p \left(\nu \sin \lambda_{b0} - \frac{i_{10} - \sin \gamma}{\cos \gamma} \right) - (r_0 + r_1) [1 + \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \lambda_{b0} \cos(\nu + \varphi_0)]; \\
 A &= r_{b0} \cos(\nu + \varphi_0) + u \sin(\nu + \varphi_0) \cos \lambda_{b0}; \\
 B &= r_{b0} \sin(\nu + \varphi_0) - u \cos(\nu + \varphi_0) \sin \lambda_{b0}; \\
 C &= p \nu - u \sin \lambda_{b0}; \quad \gamma = \beta - \lambda_0; \quad \lambda_0 = 90^\circ - \beta_0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где u, ν – криволинейные координаты производящей поверхности червячной фрезы (ЧФ); r_{b0}, r_0 – основной и делительный диаметр червячной фрезы; λ_{b0}, λ_0 – основной и делительный углы подъема витков червячной фрезы; φ_0 – угол поворота; p – винтовой параметр производящей поверхности червячной фрезы; γ – параметрический угол; β, β_0 – углы наклона зубьев неэвольвентного червячного колеса и червячной фрезы; $i_{10} = z_0/z_1$ – передаточное число станочного зацепления (z_0, z_1 – числа витков (зубьев) червячной фрезы и неэвольвентного червячного колеса).

Поверхность (1) по своему строению значительно ближе к эвольвентной поверхности зубьев взятого ранее для исследования шевера, чем поверхность обле-

гающего шевера, образованная коническим кругом. Если теперь преобразовать эту поверхность в производящую, то образованная ею поверхность зуба колеса будет эвольвентной и при $z_0 = z_1$ образует поверхность зубьев исходного шевера.

Но винтовую эвольвентную поверхность червяка с $z_0 = z_1$ сделать точной очень трудно. Поэтому при $z_0 \ll z_1$, например, $z_0 = 1..4$, образованная производящей поверхностью червяка неэвольвентная поверхность червячного колеса будет несколько другой. Если принять, что диаметр червяков $z_0 = z_1$ и $z_0 = 1..4$ одинаковы, то при совмещении их поверхностей в точках, лежащих на делительных цилиндрах, поверхность червяка с $z_0 = 1..4$ будет менее изогнутой. Для оценки разницы изогнутости и анализа формы производящей поверхности облегающего шевера нужно знать ее кривизну.

Выполнив преобразования в соответствии с [9] для вычисления главных нормальных кривизны поверхности (1) и положения главных нормальных сечений получим зависимости:

$$K_{I,II} = \frac{i_{10} \cos \beta + \sin \lambda \left(\frac{dv}{dt} + 1 \right)_{1,2}}{r_0 \sin \lambda \sin \alpha \left[1 + f \left(\frac{dv}{dt} + 1 \right)_{1,2} \right]}; \quad (2)$$

$$\chi_{I,II} = \frac{i_{10} \cos \beta + \sin \lambda \left(\frac{dv}{dt} + 1 \right)_{1,2}}{\cos \alpha \cos \lambda \left(\frac{dv}{dt} + 1 \right)_{1,2} - i_{10} \sin \alpha \cos \beta}, \quad (3)$$

где $K_{I,II}$ – главные нормальные кривизны в полюсной точке поверхности неэвольвентного червячного колеса; $\chi_{I,II}$ – углы, определяющие положения главных нормальных сечений.

Значение $\left(\frac{dv}{dt} + 1 \right)_{1,2}$ есть корни уравнения

$$A \left(\frac{dv}{dt} + 1 \right)^2 + (Bf + C) \left(\frac{dv}{dt} + 1 \right) + D = 0; \quad (4)$$

$$A = \cos^2 \alpha \cos^2 \lambda - 1; \quad B = i_{10} (\sin^2 \alpha \sin \beta \cos \lambda - \sin \lambda \cos \beta);$$

$$C = \frac{i_{10} \cos \beta}{\sin \lambda} + \cos \lambda (\sin^2 \alpha \cos \lambda + \sin \lambda \operatorname{tg} \beta); \quad D = i_{10} \sin \beta \cos \lambda (1 + \sin^2 \alpha);$$

$$f = \frac{\sin \alpha \sin \beta + \cos \alpha \cos \lambda \sin \lambda (\cos \lambda \operatorname{tg} \beta - \sin \lambda) i_{01}}{-\sin \alpha \sin \lambda \cos(\beta + \lambda)}; \quad i_{01} = \frac{z_2}{z_0},$$

где α – угол профиля исходного контура.

Первое главное направление неэвольвентной поверхности зуба шевера в полюсной точке составляет угол χ_I с касательной к линии зуба шевера. При больших диаметрах (более 400мм) червячного абразивного круга, которым обрабатывают неэвольвентную поверхность зубьев шевера, величина угла $\chi_I = (5..8)^\circ$. В направлении, параллельном оси шевера, нормальную кривизну к поверхности зуба найдем по формуле Эйлера:

$$K = K_I \cos^2 \chi_I + K_{II} \sin^2 \chi_{II}, \quad (5)$$

где $K_{I,II}$ – главные нормальные кривизны поверхности в заданной точке.

Расчет стрелки вогнутости неэвольвентной производящей поверхности облегающего шевера с параметрами $m = 1\text{мм}$, $\beta_0 = 15^\circ$, $z_0 = 40$, обработанной червячным одновитковым шлифовальным кругом диаметром 400мм показали, что стрелки вогнутости продольной линии его зуба составляют $f = 0,13\text{мм}$. При такой стрелке вогнутости поверхность зуба обработанного колеса не должна иметь отклонений в виде выпуклостей или вогнутостей. Для получения бочкообразной продольной модификации поверхности зуба без применения механизма качания стола рассчитанную вогнутость следует увеличить на величину заданной модификации.

Выводы. Таким образом, анализ результата исследования показывает, что:

1. Изготовление производящей поверхности облегающего шевера червячным абразивным кругом большого диаметра с эвольвентной винтовой поверхностью по схеме нарезания червячного колеса позволяет получить квазилинейный контакт производящей и обрабатываемой поверхностей.
2. Параметрами контактной зоны в станочном зацеплении можно управлять; наиболее влияющие параметры – угол наклона зубьев шевера β_0 и его диаметр d_0 ;
3. Производящая поверхность зубьев шевера по геометрическому строению позволяет получить сопряженное станочное зацепление, что гарантирует повышение качества обработки.

Список литературы: 1. Гулида Э.Н. Технология отделочных операций зубообработки цилиндрических колес. – Львов: Вища школа, 1977. – 168с. 2. Калашиников С.Н. Шевингование зубчатых колес / С.Н.Калашиников, А.С. Калашиников. – М.: Высшая школа, 1985. – 272с. 3. Петрухин С.С. Классификация видов шевингования в области технологии машиностроения / С.С. Петрухин, Н.Т. Ананьев // Прогрессивная технология машиностроения. – Тула: ТулПИ, 1970. – Вып. IV. – С. 71-77. 4. Надей В.С. Механизм возникновения и развития погрешностей зубчатого венца при шевинговании / В.С. Надей, Хамдан Мухаммед // Проблемы автоматизации и энергообеспечения в машиностроении. Сб. статей. – Кировоград, 1995. – С. 61-66. 5. Хамдан Мухаммед. Определение погрешности зубчатого венца по проходам при шевинговании // Проблеми розробки, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки. Зб. наук. праць. – Кировоград, 1995. – С. 97-100. 6. Болотовский И.А. Прямозубые конические передачи: Справочник / И.А. Болотовский, Б.И. Гурьев, В.Э. Смирнов, Б.И. Шендрей. – М.: Машиностроение, 1981. – 104с.

Поступила в редколлегию 27.04.12